

**ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ ЛИТОСФЕРЫ АМУРО-ЗЕЙСКОГО ОСАДОЧНОГО
БАССЕЙНА ПО ПРОФИЛЮ МТЗ г. БЛАГОВЕЩЕНСК–п. БИРАКАН**

В.Б. Каплун

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, ул. Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000;
e-mail: Kaplun@itig.as.khb.ru*

Поступила в редакцию 18 марта 2011 г.

Рассмотрены результаты магнитотеллурических зондирований (МТЗ) на профиле г. Благовещенск – п. Биракан длиной 350 км. Профиль начинается в Луныцзян-Селемджинском орогенном поясе и оканчивается на Цзямусы-Буреинском массиве, пересекая Амуро-Зейский осадочный бассейн с северо-запада на юго-восток в его южной части. Выполнено 12 зондирований в широком частотном диапазоне от $1 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^{-4}$ Гц. Построены геоэлектрические разрезы для глубин 2 и 150 км, определены геоэлектрические параметры осадочного чехла бассейна, выделены области аномальной проводимости земной коры и верхней мантии.

Ключевые слова: магнитотеллурические зондирования, глубинное строение, Амуро-Зейский осадочный бассейн.

ВВЕДЕНИЕ

Амуро-Зейский осадочный бассейн мезозойско-кайнозойского возраста расположен в Центрально-Азиатском тектоническом поясе и наложен на структуры Луныцзян-Селемджинского орогенного пояса, Цзямусы-Буреинского, Аргуно-Мамынского и Дягдачи массивов (микроконтинентов) [22], имеет сложное очертание и занимает площадь около 93000 км². Активное изучение бассейна геофизическими методами началось в 60-е годы прошлого столетия и было направлено на поиски нефти [3]. К настоящему времени вся площадь бассейна охвачена мелко- и среднемасштабной геологической съемкой, почти вся территория изучена государственной гравиметрической съемкой масштаба 1:200 000, аэромагнитными съемками масштаба 1:25 000–1:200 000, на отдельных площадях выполнены электроразведочные работы (методы ТТ, ВЭЗ, ДЗ) и сейсморазведочные профили (КМПВ, МОВ), пробурено примерно 1000 картировочных скважин, из них только 70 глубиной более 500 м и лишь одна достигла глубины 2254 м. По результатам работ были построены карты мощности осадочного чехла, структурно-тектонические схемы поверхности фундамента [14, 19, 20, 23]. В строении бассейна было выделено пять систем рифтогенных впадин, ориентированных в северо-восточном направлении и разделенных поднятиями фундамента

[23]. Проведенные исследования на поиски нефти не дали положительного результата, хотя в соседнем бассейне Сунляо (КНР), который является продолжением Амуро-Зейского бассейна, обнаружены крупные месторождения [13].

Глубинное строение земной коры Амуро-Зейского бассейна было изучено только тремя профилями сейсмозондирования (ГСЗ и МОВЗ): г. Свободный–г. Комсомольск-на-Амуре [18], р. Зея–р. Бурея [16], г. Тында–п. Амурзет [10], по которым оценена мощность земной коры в 37–40 км. По крайнему северу бассейна, вдоль трассы БАМ, имеются результаты магнитотеллурических зондирований до глубины 60–70 км, показывающие наличие проводящих зон в средней части земной коры бассейна [17].

В связи с этим целью исследований было изучение строения литосферы Амуро-Зейского осадочного бассейна. Объектом исследований были крупные блоки литосферы, границы между которыми скрыты под осадочным чехлом бассейна. Для решения этой задачи использовался метод магнитотеллурического зондирования. Полевые работы проводились по профилю г. Благовещенск–п. Биракан, который простирается с северо-запада на юго-восток на расстояние 350 км, начинаясь в Луныцзян-Селемджинском орогенном поясе и оканчиваясь на Цзямусы-Буреинском массиве, пересекая Амуро-Зейский осадочный бассейн в его южной части (рис. 1). По профилю выпол-

нено 12 магнитотеллурических зондирований (МТЗ) со средним шагом 30 км.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Регистрация естественного электромагнитного поля Земли проводилась в широком частотном диапазоне от $1 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^{-4}$ Гц с использованием цифровой 24-разрядной станции MTU-5A производства фирмы Phoenix (Канада) с двумя типами индукционных магнитных датчиков АМТС-30 и МТС-50, имеющими частотный диапазон 10000 ± 0.1 Гц и 400 ± 0.0001 Гц, соответственно. Индукционные датчики и электрические линии устанавливались на местности согласно инструкции в азимутах север-

юг – X-компонента, запад-восток – Y-компонента. Длина электрических линий равнялась 70 м, в качестве заземлителей использовались неполяризующиеся угольные электроды. Время регистрации электромагнитного поля в высокочастотном диапазоне составляло около 40 мин., а в низкочастотном – в среднем около 40 час. Обработка полевых данных велась с использованием пакета программ SSMT2000 фирмы Phoenix Geophysics (Канада). Дальнейшее редактирование кривых МТЗ с целью удаления на них “отскоков” значений, связанных с различного рода помехами, и интерпретация проводились в рамках программ “Корректор”, “MTS-Prof” и “MTS-Prof INV” фирмы “Северо-Запад” (г. Москва).

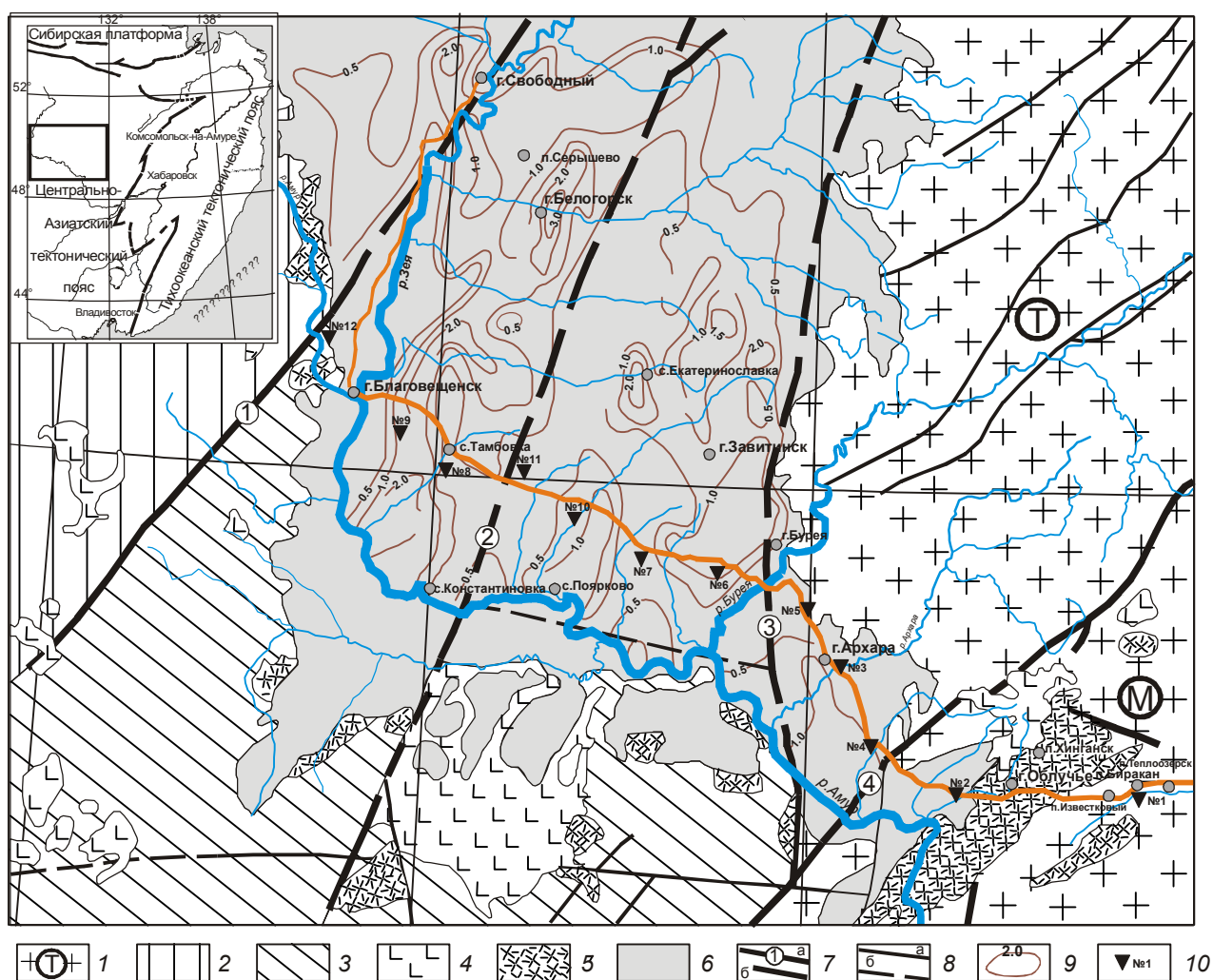


Рис. 1. Тектоническая схема района работ, по [22] с упрощениями.

1 – Цзямусы-Буреинский массив; Т – Туранский блок, М – Малохинганский блок; 2 – Северо-Хинганский орогенный пояс; 3 – Луньцзян-Селемджинский орогенный пояс; 4 – базальтоиды; 5 – риодациты; 6 – осадочный чехол Амуро-Зейского бассейна; 7 – основные разломы: а – установленные, б – предполагаемые; их номера: 1 – Такси, 2 – Харбинский, 3 – Западно-Туранский, 4 – Хинганский; 8 – второстепенные разломы: а – установленные, б – предполагаемые; 9 – изопахиты мощности осадочного чехла; 10 – пункты МТЗ и их номера.

На врезке прямоугольником показано местоположение района работ.

АНАЛИЗ КРИВЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКИХ ЗОНДИРОВАНИЙ ПО ПРОФИЛЮ

В результате обработки полевых данных были построены амплитудные и фазовые кривые МТЗ в направлениях азимутов измерений (рис. 2). При рассмотрении кривых вдоль профиля с запада на восток можно выделить несколько характерных черт их поведения.

Амплитудные кривые по их форме можно разделить на три участка. Первый участок представлен кривой МТЗ №12, которая характеризуется крутой восходящей левой ветвью, переходящей в максимум с последующей полого ниспадающей правой ветвью. Второй участок профиля представлен кривыми МТЗ от № 9 до № 6, включительно. Эта группа кривых характеризуется ниспадающей левой ветвью с сопротивлениями 50–80 Ом·м на периоде 10^{-4} с до примерно 10 Ом·м на периодах от 0.1 до 1 с. В этом диапазоне периодов расположен четко выраженный минимум с последующей, в большинстве случаев, круто восходящей ветвью, переходящей в широкий максимум с полого ниспадающей ветвью. Третий участок профиля представлен кривыми МТЗ № 5÷№ 1. Эта группа кривых имеет наиболее сложную и разнообразную форму. Основной характерной чертой кривых этой группы является наличие минимума в диапазоне периодов от 0.01 до 0.1 с на фоне восходящей или пологой левой ветви амплитудной кривой МТЗ, которая переходит в широкий максимум с последующей полого ниспадающей правой ветвью.

По совместному поведению широтной и меридиональной кривых МТЗ можно выделить следующие характерные особенности. В большинстве случаев, за исключением МТЗ № 12, левые ветви обеих кривых, до имеющегося на них минимума, совпадают или близки друг другу. Низкочастотные ветви большинства кривых расходятся. Широтная и меридиональная кривые зондирования №12 в значительной мере отличаются друг от друга в области высоких частот, при понижении частоты ниже 1Гц их форма близка и представляет собой полого ниспадающую ветвь. Общей характерной чертой поведения амплитудных кривых является наличие левой восходящей ветви с периодов 0.1÷1 с, на некоторых пунктах с более коротких периодов (МТЗ № 12, № 2, № 5), переходящей в максимум с последующей полого ниспадающей правой ветвью. Подобное поведение кривых может свидетельствовать об однотипном глубинном строении геоэлектрического разреза, параметры которого – сопротивление и мощность слоев – меняются по латерали.

Подобный характер поведения имеют и фазовые кривые, за исключением их низкочастотных ветвей,

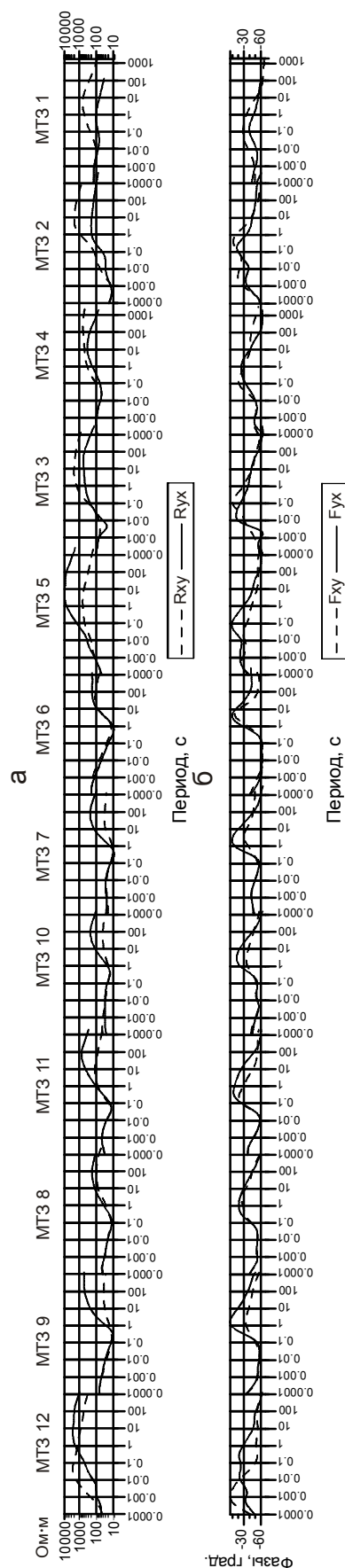


Рис. 2. Амплитудные (а) и фазовые (б) кривые МТЗ профиля г. Благовещенск – п. Биракан.

которые в отличие от амплитудных кривых не расходятся, а наоборот сходятся.

АНАЛИЗ ИСКАЖЕНИЙ

Под искажением кривой МТЗ понимается отличие кривой, полученной в условиях реального горизонтально-неоднородного разреза, от кривой МТЗ, рассчитанной для горизонтально-однородного разреза с параметрами, соответствующими точке наблюдения [9].

До перехода к интерпретации кривых магнитотеллурических зондирований необходимо провести их анализ для того, чтобы: а) определить характер искажений и выбрать способ, приводящий к уменьшению их влияния; б) выбрать наименее искаженную кривую; в) определить размерность геоэлектрического разреза, в рамках которого будет вестись интерпретация полевых данных.

Для анализа искажений использовано несколько параметров, характеризующих степень неоднородности геоэлектрического разреза: форма кривых МТЗ и их изменение вдоль профиля, форма полярных диаграмм основного и дополнительного импедансов, значения параметров неоднородности – N и асимметрии – $skew$ [2]

$$N = (Z_{xy} - Z_{yx}) / (Z_{xy} + Z_{yx}),$$

$$Skew = |(Z_{xx} + Z_{yy}) / (Z_{xy} - Z_{yx})|.$$

Параметр неоднородности N позволяет оценить степень горизонтальной геоэлектрической неоднородности, а параметр асимметрии $skew$ – степень отклонения среды от двумерно-однородной или осесимметричной. В случае горизонтально-однородной среды параметры N и $skew$ равны нулю.

Как отмечалось выше, левые высокочастотные ветви широтной и меридиональной кривых на большинстве пунктов зондирований, за исключением МТЗ № 12, совпадают или очень близки друг другу, импедансные полярные диаграммы основного импеданса (рис. 3) близки к круговым при малых величинах дополнительного импеданса, параметры неоднородности и асимметрии не превышают 0.3. Это свидетельствует о том, что верхняя часть геоэлектрического разреза для большинства пунктов зондирования близка к изотропной, в ней отсутствуют резкие геоэлектрические неоднородности, и ее можно интерпретировать в рамках одномерной модели. Совершенно другая ситуация складывается на более низких частотах, когда амплитудные кривые МТЗ начинают расходиться после первого минимума. С увеличением периода регистрации форма импедансных полярных диаграмм основного импеданса сначала преобразуется в овалы, а затем приобретает вид восьмерок. Наиболее отчетли-

во это проявляется в юго-восточной части Амуро-Зейского бассейна и за его пределами в пунктах наблюдения с № 5 по № 1. Направление большой оси также изменяется как в зависимости от периода регистрации, так и между пунктами наблюдения. Тем не менее, имеются и некоторые закономерности. Во-первых, на пунктах с № 12 по № 5, включительно, направление большой оси импедансной диаграммы основного импеданса в основном субширотное, а на оставшихся пунктах – субмеридиональное. Во-вторых, импедансная полярная диаграмма дополнительного импеданса для первой группы зондирований имеет четырехлепестковую форму и величина дополнительного импеданса значительно меньше по отношению к величине основного импеданса в отличие от второй группы зондирований, где величина дополнительного импеданса имеет значения, сопоставимые со значениями основного импеданса. Наиболее отчетливо неоднородное строение геоэлектрического разреза профиля отражено в параметрах неоднородности (N) и асимметрии ($skew$). Наиболее подвержены влиянию геоэлектрических неоднородностей зондирования пунктов № 12, № 10 и № 3, причем влияние этих неоднородностей проявляется на различных периодах по-разному. Например, в пункте № 12 наибольшее проявление неоднородности разреза отмечается в средней части зарегистрированного диапазона периодов, а в пункте № 10 – в короткопериодной части, а с увеличением периода влияние неоднородности уменьшается. Наиболее неоднородное строение разреза наблюдается в пункте № 3, где лишь самая короткопериодная часть не подвержена влиянию геоэлектрических неоднородностей и может интерпретироваться в рамках одномерной модели.

Дополнительно была проведена оценка размерности среды с использованием программы WILDIM [25]. Расчеты выполнялись для 100 частот во всем диапазоне регистрации магнитотеллурических кривых профиля. Результаты расчетов приведены в таблице. Для удобства представления и наглядности результаты сгруппированы по декадам. Полученные результаты подтверждают выводы, сделанные из анализа кривых МТЗ, импедансных полярных диаграмм и параметров неоднородности и асимметрии.

Из таблицы видно, что, помимо наличия в разрезе трехмерных неоднородностей, амплитудные кривые МТЗ подвержены влиянию гальванических искажений, которые проявляются на кривых в различных диапазонах периодов.

Для качественной оценки геоэлектрического разреза по профилю рассмотрим распределение удельного сопротивления и фазы импеданса в зависимости от зарегистрированного периода наблюдения (рис. 4). На

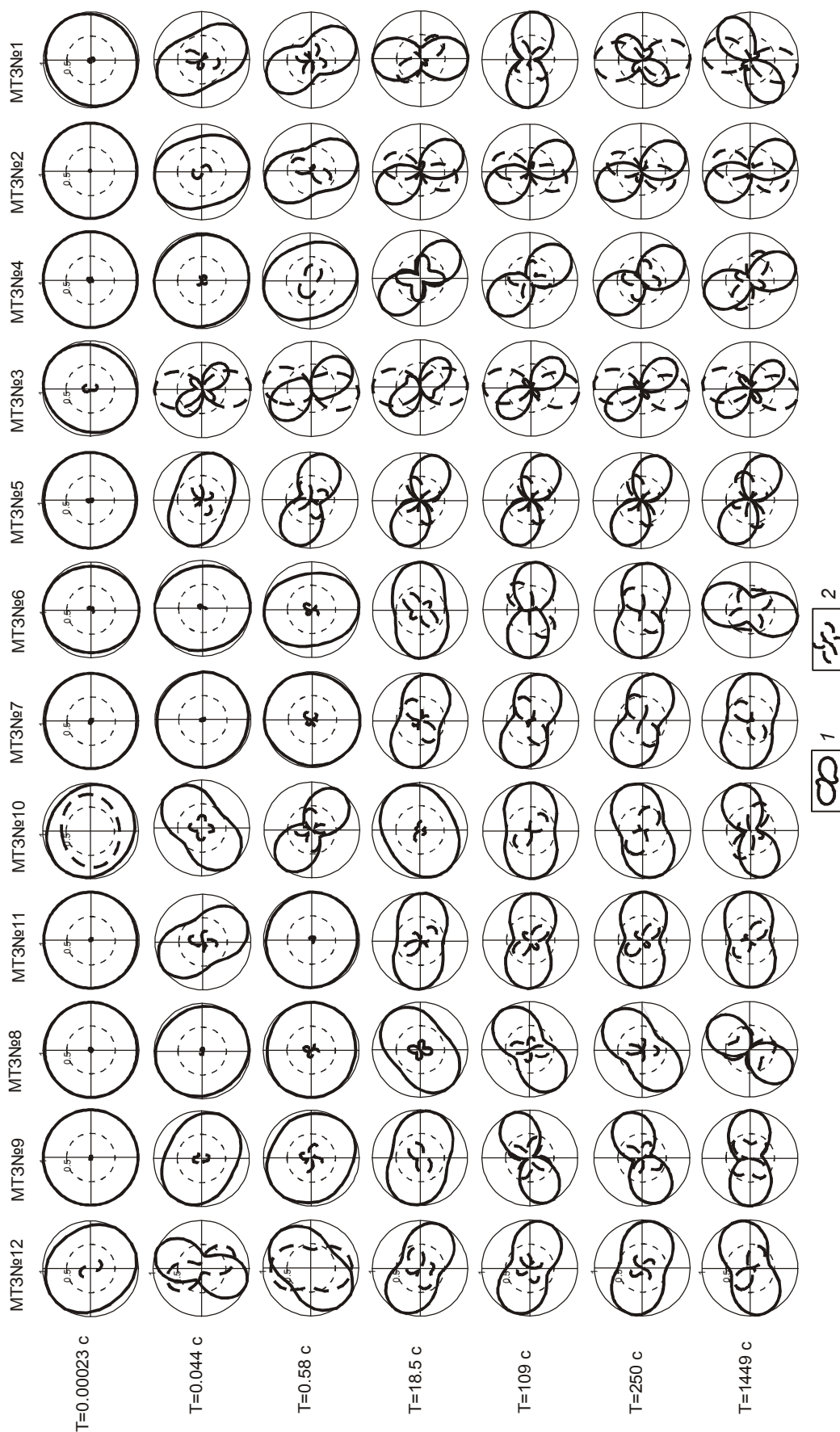


Рис. 3. Импедансные полярные диаграммы основного Z_{xy} (1) и дополнительного Z_{xx} (2) импедансов. Диаграммы нормализованы по Z_{xy} ($Z_{xx}/Z_{xy}Max$).

Таблица. Параметры размерности среды в пунктах зондирования.

Диапазон периодов, с	Пункты МТЗ											
	№ 12	№ 9	№ 8	№ 11	№ 10	№ 7	№ 6	№ 5	№ 3	№ 4	№ 2	№ 1
1.0E-4 ÷ 1.0E-3	3D	1D	1D	1D	3D/1D2D	1D	1D	1D	3D	1D	1D	1D
1.0E-3 ÷ 1.0E-2	3D	3D/1D2D	1D	1D	3D	1D	1D	3D	3D	1D	3D	3D
1.0E-2 ÷ 1.0E-1	3D/2D	3D	1D	1D	0	1D	1D	3D	3D	3D	3D	3D
1.0E-1 ÷ 1.0E+0	3D/2D	3D	3D	3D	3D	1D	1D	3D	3D	0	3D	3D
1.0E+0 ÷ 1.0E+1	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D	3D
1.0E+1 ÷ 1.0E+2	3D	3D/2D	3D/1D2D	3D	3D	3D	3D	3D/1D2D	3D/1D2D	3D	3D	3D
1.0E+2 ÷ 1.0E+3	0	3D	3D	3D	3D	0	3D	3D/1D2D	3D/1D2D	3D/2D	3D	3D
1.0E+3 ÷ 1.0E+4	0	3D/2D	3D/2D	3D	0	3D/2D	0	3D/1D2D	3D/1D2D	3D	3D	3D

Примечание. 1D – одномерная среда; 3D – трехмерная среда; 3D/2D – двумерная среда, находящаяся под воздействием гальванических искажений; 3D/1D2D – гальванические искажения над одномерными или двумерными структурами (без определения направления простирания структуры); 0 – не определено.

рисунке 4 показаны псевдоразрезы удельного сопротивления и фазы импеданса в меридиональном (R_{xy} и φ_{xy} – рис. 4а, в) и широтном (R_{yx} и φ_{yx} – рис. 4б, г) направлениях. На обоих псевдоразрезах удельного сопротивления отчетливо выделяется область пониженных значений, расположенная между пунктами № 9 и № 6 и ограниченная с обеих сторон областями высоких электрических сопротивлений. Эта область хорошо выражена и на псевдоразрезах фазы импеданса резким изменением ее значений. Остальные части псевдоразрезов также имеют хорошее соответствие друг с другом, хотя и отличаются величинами параметров. Подобное распределение электрического сопротивления и фазы импеданса свидетельствует о том, что кривые МТЗ, измеренные в обоих направлениях, отражают реальное распределение геоэлектрических параметров, и имеющиеся в разрезе аномальные значения связаны с реальными геологическими объектами, а не вызваны только искажениями. Тем не менее, имеющиеся различия в распределении электрического сопротивления и фазы импеданса, в их величине, сложный характер поведения параметров неоднородности N и асимметрии skew, а также форма импедансных полярных диаграмм и вариации азимутов их осей не позволяют принять одну из азимутальных кривых в качестве наименее искаженной или определить азимут регионального простирания структур, в который можно пересчитать азимутальные кривые. Из анализа полученного материала видно, что отдельные кривые или группы кривых, или их отдельные частотные ди-

апазоны отвечают различным классам моделей: одномерным, двумерным или трехмерным. Помимо этого на каждое зондирование накладывается влияние локальных и региональных неоднородностей. Однако, как было показано выше, полученные амплитудные и фазовые кривые МТЗ дают сходную между собой информацию о геоэлектрическом разрезе. В данной ситуации предлагается использовать для дальнейшей количественной интерпретации эффективные кривые

$$\rho_{эф} = 0.2 \cdot T \cdot |Z_{эф}|^2,$$

где: $Z_{эф} = \sqrt{Z_{xx} \cdot Z_{yy} - Z_{xy} \cdot Z_{yx}}$, T – период колебаний МТ-поля (с), $Z_{эф}$ – эффективный, Z_{xy} и Z_{yx} – основные, Z_{xx} и Z_{yy} – дополнительные импедансы (мВ/км·нТ).

Эффективный импеданс не зависит от ориентации координатных осей, а зависит только от распределения удельного сопротивления в Земле и частоты вариаций МТ-поля [1]. Использование эффективных кривых позволит сгладить влияние геоэлектрических неоднородностей и получить наиболее корректное распределение электрического сопротивления вдоль профиля.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Интерпретация эффективных кривых МТЗ проводилась в рамках одномерной модели с использованием программы MTS-Prof INV фирмы “Северо-Запад” (г. Москва). Программа предназначена для инверсии данных магнитотеллурических зондирований

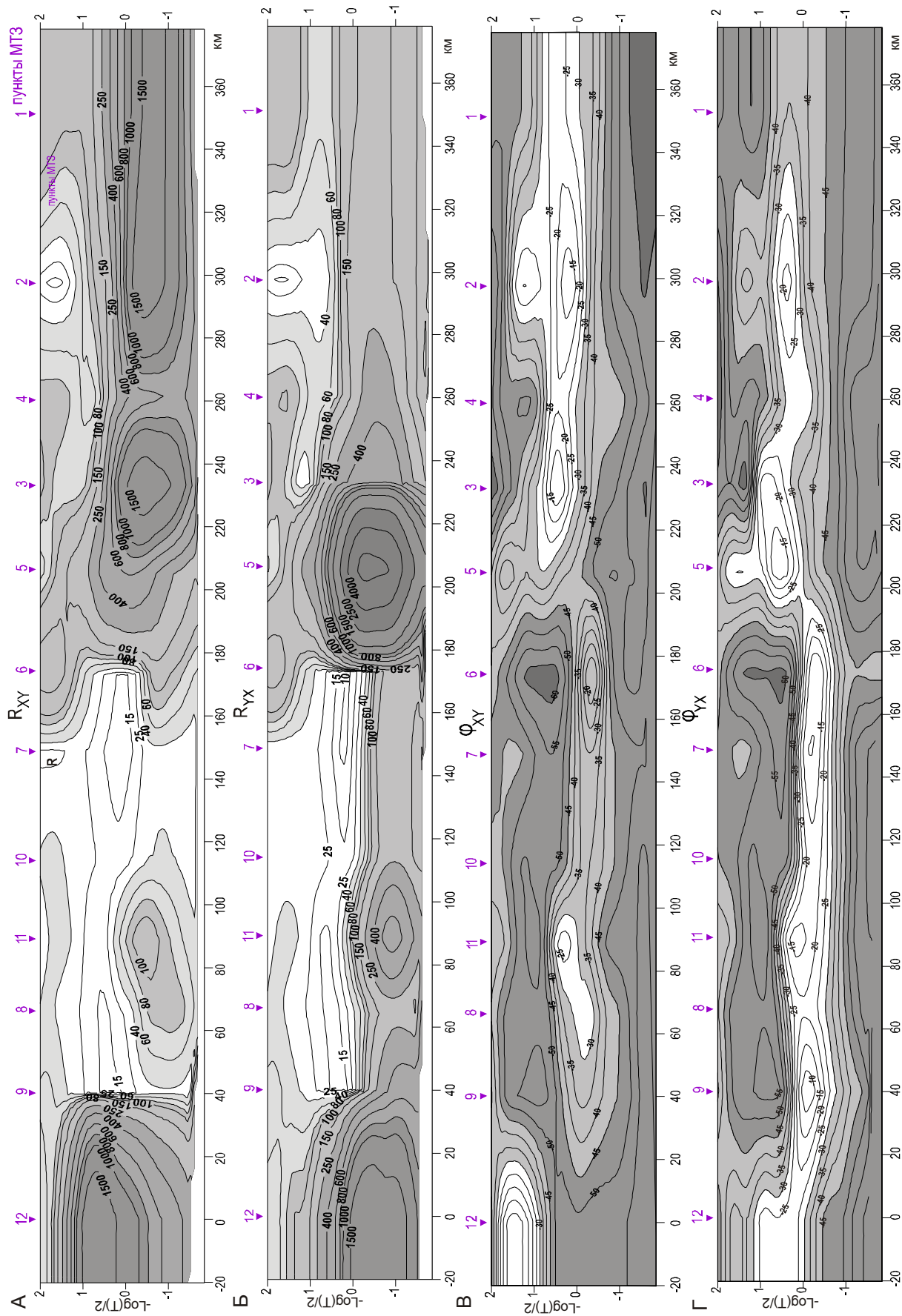


Рис. 4. Псевдорезрезы удельного сопротивления R_{xy} – (А) и R_{yx} – (Б), фазы импеданса ϕ_{xy} – (В) и ϕ_{yx} – (Г). Цифрами на разрезах указаны величины удельного сопротивления и фазы, соответственно.

по профилю или площади. Инверсия основана на построении и последующей нелинейной минимизации общего функционала невязки в сочетании с эмпирико-эвристическими поправками в ходе минимизации.

При проведении региональных работ каждое отдельное зондирование располагается в отличных от других геоэлектрических условиях и подвержено влиянию как локальных поверхностных неоднородностей, так и региональных эффектов. В этих условиях, исходя из масштабов исследований, наиболее стабильными свойствами по латерали, вероятно, обладает верхняя мантия на глубинах 300 и более километров. В связи с этим для уменьшения влияния неоднородного строения земной коры и снижения региональных эффектов проведем нормирование кривых МТЗ к наибольшему периоду, имеющемуся на всех зондированиях, равному 1000 с. Примерно оценим глубину проникновения электромагнитного поля для этого периода по формуле $h_T = ((10 \rho_T \cdot T)^{1/2})/8.9$, где: ρ_T – удельное сопротивление в Ом·м, T – период в секундах [9]. При $\rho_T = 1000$ Ом·м h_T равняется 355 км, а при ρ_T , равном 100 Ом·м, и периоде 1000 с получим глубину в 112 км. По оценке Л.Л. Ваньяна [5], эффективная глубина проникновения магнитотеллурического поля при сопротивлении 100 Ом·м на периоде 1000 с составляет 160 км, а при 1000 Ом·м – 500 км. Согласно рисункам 4А и 4Б, большая часть электрического сопротивления имеет значения свыше 100 Ом·м, что позволяет использовать выбранный период для нормирования.

Нормализация проводилась с использованием программы MTS-Prof с учетом неравномерности шага по абсциссе квазилинейным экспоненциальным фильтром постоянной ширины в скользящем по абсциссе окне. Фильтрация осуществляется в соответствии с формулой:

$$\tilde{f}_j(x) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(x)r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}},$$

где $f(x)$ – сглаживаемая функция модуля импеданса на выбранном периоде, i – индекс точки, по которой ведется суммирование, j – индекс точки, в которой проводится трансформация сглаживания. Весовые коэффициенты r_{ij} рассчитываются по формуле:

$$r_{ij} = e^{-\left(\frac{|x_j - x_i|}{\tau}\right)^q},$$

где τ – полуширина фильтра, q – крутизна фильтра, x – абсцисса точки.

Полуширина фильтра τ – регулирующий дополнительный множитель в показателе экспоненциаль-

ного фильтра подбирался опытным путем и составлял 100 км.

Параметр крутизны фильтра q задавался равным 7. Далее для каждой точки рассчитывается коэффициент умножения $k = Z_{\text{норм}}(t)/Z_0(t)$, где t – выбранный период, и значения модулей умножаются на k .

В результате инверсии эффективных нормированных амплитудных кривых МТЗ был построен геоэлектрический разрез по профилю г. Благовещенск – п. Биракан для двух глубин – 2 км и 150 км (рис. 5). На рисунке 5а показано распределение удельного электрического сопротивления вдоль профиля до глубины 2 км. На геоэлектрическом разрезе отчетливо выделяется осадочный чехол, имеющий низкие сопротивления порядка первых десятков Ом·м, и подстилающий его высокоомный фундамент с сопротивлениями свыше 1000 Ом·м. Наибольшая мощность осадочного чехла до 1.5 км наблюдается в Амуро-Зейском осадочном бассейне между пунктами МТЗ № 9 и № 5. Юго-восточная часть бассейна до глубины 1.5 км имеет также пониженные значения электрического сопротивления по отношению к фундаменту, но значительно выше, чем между пунктами № 9 и № 5, и составляет первые сотни Ом·м. Наиболее высокое электрическое сопротивление на этих глубинах отмечается в районе пункта № 12, мощность осадочного чехла минимальная. Под пунктом № 3 на глубине около 200 м выделяется высокоомная аномалия, которая может быть связана с выступом фундамента. Подъем кровли высокоомного фундамента отмечается также и в районе пункта № 11, что может быть связано как с подъемом блока фундамента, так и с нескомпенсированным влиянием Харбинского разлома. Полученные результаты хорошо согласуются с уже имеющимися данными о мощности осадочного чехла (рис. 1).

На рис. 5б представлен геоэлектрический разрез до глубины 150 км, на котором можно выделить несколько характерных особенностей глубинного строения как по латерали, так и по глубине. По простиранию геоэлектрический разрез можно разделить на две части, граница между которыми примерно совпадает с Западно-Туранским разломом. Восточнее этого разлома геоэлектрический разрез характеризуется относительно простым строением с пониженными значениями электрического сопротивления, изменяющегося от 500 до 50 Ом·м на всю мощность, за исключением самой верхней 10-километровой высокоомной части. Западная часть разреза имеет сложное строение как по простиранию, так и по глубине. По глубине в этой части разреза выделяется чередование слоев повышенного и пониженного сопротивления. Верхний слой имеет высокое сопротивление, мощность его изменяется от 25–30 км на западе до

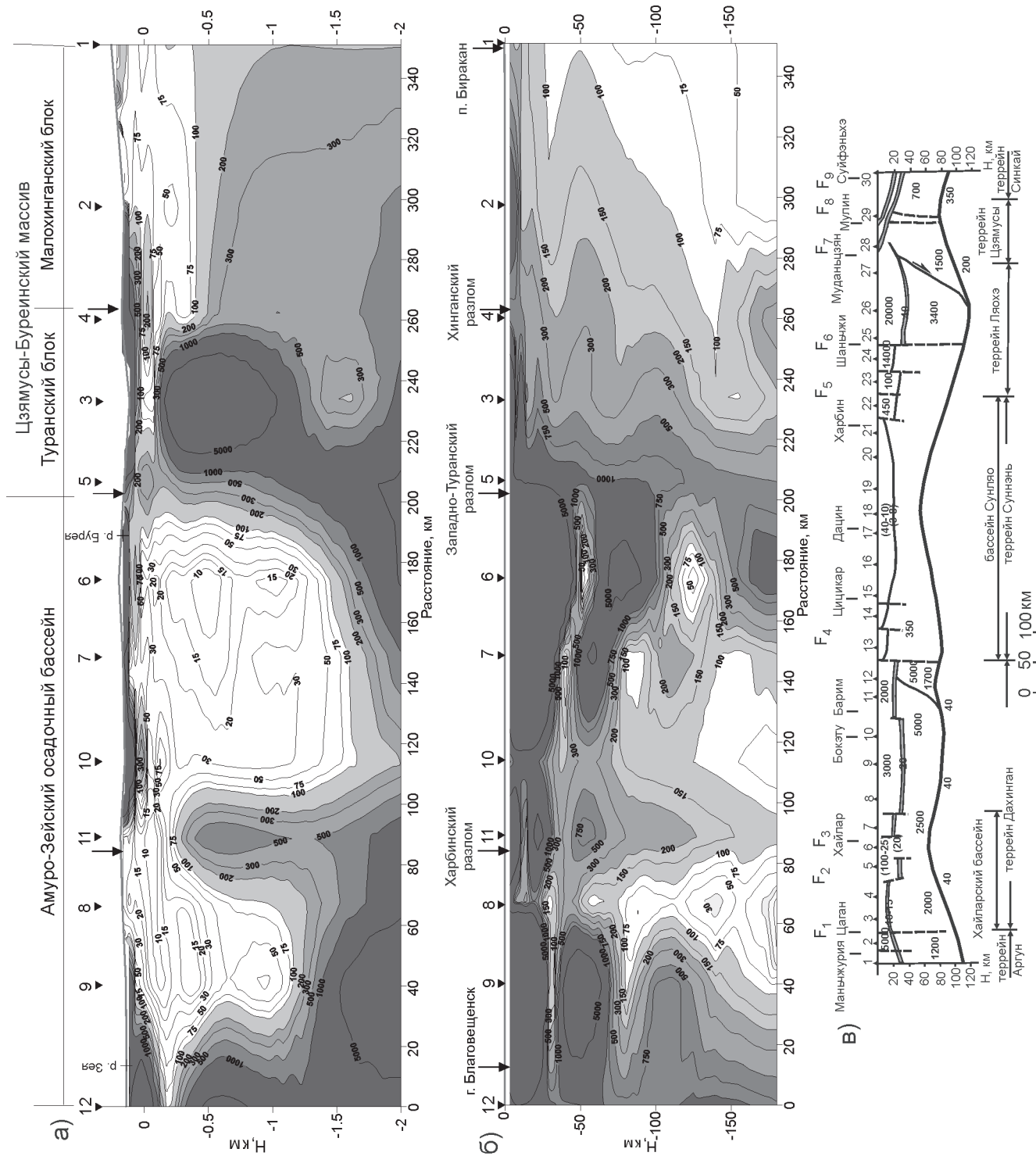


Рис. 5. Геоэлектрический разрез по профилю г. Благовещенск–п. Биракан: а) до глубины 2 км, б) до глубины 150 км, в) геоэлектрический разрез по профилю Маньчжурия–Суифэньхэ [24]. а, б – цифры изолиний показывают значения удельного электрического сопротивления в Ом·м. Перевернутые треугольники с цифрами – пункты МТЗ и их номера; в – цифры на разрезе – удельное электрическое сопротивление в Ом·м; F – разломы и их названия: 1 – Дербуганский, 2 и 3 – разломы внутри Хайларского бассейна, 4 – Чэньцзянский, 5 – Харбинский, 6 – Илань-Итунский, 7 – Муданьцзянский, 8 – Дуньхуа-Мишаньский, 9 – Западно-Приморский.

40–45 км на востоке. В основании верхнего высокоомного слоя прослеживается слой пониженного электрического сопротивления – 50–100 Ом·м – и мощностью 5–10 км. Глубже можно выделить еще один слой высокого сопротивления до 5000 Ом·м, переменной мощностью от 25 до 40 км, подошва которого плавно погружается с запада на восток с глубины 60–65 км до 100 км. Однако этот слой не является однородным, в центральной части он прорывается зонами пониженного сопротивления, проникающими в верхнюю часть разреза вплоть до глубины 10 км, где в районе пунктов № 8 и № 11 появляется очень тонкий слой пониженного сопротивления 500 Ом·м. Каналом, по которому область пониженных сопротивлений поднимается в верхнюю часть разреза, вероятно, служит Харбинский разлом, и, судя по разрезу, его положение находится ближе к пункту МТЗ № 8. В основании второго высокоомного слоя располагается область низких сопротивлений менее 100 Ом·м. Область наиболее пониженных электрических сопротивлений этой части профиля расположена между Харбинским и Западно-Туранским разломами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты интерпретации магнитотеллурических данных показали хорошую разрешающую способность метода магнитотеллурических зондирований для изучения осадочного чехла Амура-Зейского осадочного бассейна (рис. 5а). Контрастная разница электрических сопротивлений осадочного чехла и фундамента позволяет определять границу между ними с высокой степенью вероятности. Электрическое сопротивление большей части осадочного чехла бассейна равно первым десяткам Ом·м и возрастает до 100 Ом·м. Дальнейшее увеличение сопротивления связано, вероятно, с процессами литификации осадков и вторичной переработкой фундамента, электрическое сопротивление которого превышает 1000 Ом·м. Анализ магнитотеллурических параметров также показал, что строение осадочного чехла является горизонтально-слоистым, за исключением прибортовых частей, в нем, в большинстве случаев, отсутствуют резкие геоэлектрические неоднородности. Это дает возможность использовать для его изучения аудиоманнитотеллурическое зондирование (АМТЗ) с частотой регистрации электромагнитного поля $10^4 \div 1$ Гц и вести интерпретацию в рамках одномерной модели, что в значительной степени повышает производительность исследований.

Анализ распределения электрического сопротивления до глубины 150 км (рис. 5б) показывает сложное строение земной коры и верхней мантии

вдоль профиля. Информация о глубинном строении южной части Амура-Зейского осадочного бассейна практически отсутствует. Наиболее близкими являются результаты сейсмических зондирований по профилю г. Тынды-п. Амурзет [10], на котором Амура-Зейский бассейн, в его южной части, выделяется пониженными значениями продольных и поперечных волн в верхней части земной коры до глубин 12–15 км, неоднородным строением низов земной коры с преобладанием блоков с повышенными значениями сейсмических волн. В работе [4] проведен более детальный анализ этих сейсмических данных для участка, пересекающего Амура-Зейский осадочный бассейн, с привлечением других геофизических параметров – намагниченности верхнего магнитоактивного слоя, радиометрии и теплового потока. Основными сейсмическими характеристиками в анализе были значения пластовых скоростей продольных и поперечных волн в базальном слое и мощность этого слоя. В результате были выделены две аномалии пониженных скоростей поперечных волн: одна – в области сочленения бассейна с Луныцзян-Селемджинским орогенным поясом на глубинах 25–35 км и вторая – в области сочленения бассейна с Туранским блоком Цзямусы-Буреинского массива на глубинах 20–25 км. Авторами отмечается, что отличительной особенностью скоростного разреза кристаллической земной коры является региональный наклон изолинии скорости продольных волн 3.6 км/с и 3.9 км/с в юго-восточном направлении. Выделенные особенности поведения сейсмических скоростей совпадают с характером распределения электрического сопротивления, где отмечаются более ярко выраженные аномалии пониженного сопротивления в краевых частях бассейна и погружение проводящего слоя, расположенного в низах земной коры, с северо-запада на юго-восток. На сейсмическом разрезе отмечается уменьшение мощности земной коры под бассейном, что может соответствовать подъему области пониженного сопротивления под ее центральной частью (в пределах профиля).

Большое значение в тектоническом строении района исследований имеют глубинные разломы, являющиеся границами между основными структурными элементами. Профилем МТЗ пересечено три таких разлома – Харбинский, Западно-Туранский и Хинганский. Согласно рис. 5б, Харбинский разлом выделяется аномалией повышенного электрического сопротивления, уходящей на глубину 100 км. Однако, вероятнее всего, его положение связано с аномалией пониженного сопротивления, расположенной ближе к пункту МТЗ № 8, уходящей в верхнюю мантию и расположенной на границе с областью повы-

шенного сопротивления. Вероятно, что этот разлом отразился и в рельефе подошвы земной коры сейсмического профиля г. Тынды–п. Амурзет, где отмечено скачкообразное изменение глубины границы М, которое интерпретируется авторами как глубинный разлом [4]. Южное продолжение Харбинского разлома переходит с западного борга Амуро-Зейского бассейна на восточный борг бассейна Сунляо (Китай) [22] и, согласно геоэлектрическому разрезу трансекта Манчжурия-Суйфэньхэ [26], отделяет низкоомный разрез земной коры бассейна от высокоомного разреза массива Цзямусы (рис. 5в).

Сопоставляя глубинное геоэлектрическое строение обоих бассейнов – Амуро-Зейского и Сунляо (рис. 5в) [24, 26], можно выделить как сходные черты, так и отличия. Общим является наличие корового проводящего слоя и подъем кровли пород верхней мантии пониженного сопротивления. Отличия заключаются в параметрах геоэлектрических разрезов бассейнов. В бассейне Сунляо верхняя часть геоэлектрического разреза мощностью около 20 км имеет довольно низкие сопротивления 10–40 Ом·м и подстилается еще более низкоомным слоем мощностью около 10 км и средним сопротивлением 3 Ом·м. В Амуро-Зейском бассейне верхняя часть геоэлектрического разреза имеет мощность 25–30 км и высокие сопротивления свыше 1000 Ом·м, сопротивление проводящего слоя в его основании равняется примерно 100 Ом·м. Сходное геоэлектрическое строение получено и в северной части Амуро-Зейского бассейна в районе п. Февральск [17]. Здесь под высокоомным до 1000 Ом·м верхним слоем мощностью 15–20 км располагается зона пониженных сопротивлений 40–50 Ом·м. Различие геоэлектрического строения обоих бассейнов вероятно связано с различным тепловым режимом бассейнов – в бассейне Сунляо тепловой поток составляет 75–80 мВт/м², а в Амуро-Зейском бассейне – 40–45 мВт/м² [8]. Таким образом, более низкоомная верхняя мантия, приближенная к поверхности Земли, связана с величиной теплового потока, т.е. чем ниже электрическое сопротивление пород мантии и чем ближе они залегают к поверхности Земли, тем выше величина теплового потока на ее поверхности.

Возможно ли образование нефти в Амуро-Зейском бассейне? Согласно оценкам Ю.Ф. Малышева [15], геотермический градиент может составлять: для бассейнов к западу от Пограничной ступени – 24°C/км, для бассейнов с мощностью коры более 34 км – 27°C/км, для мезозойско-кайнозойских и кайнозойских бассейнов – 45°C/км. Учитывая все вышеперечисленные оценки, среднее значение геотермического градиента составляет 32°C/км. Наиболее

благоприятные условия для нефтегазообразования отмечаются при 60–130°C [7]. Такая температура в Амуро-Зейском бассейне может быть достигнута на глубинах 2–3 км.

Хотя нефтепоисковые работы в Амуро-Зейском бассейне не дали положительного результата, но анализ геологических [6, 13, 21], геофизических [4] и настоящих исследований показывает, что здесь возможно открытие месторождений нефти в наиболее погруженных его частях с мощностью осадочного чехла не менее 2 км.

Региональное гравитационное поле Амуро-Зейского осадочного бассейна (в редукции Буге) характеризуется отрицательными значениями силы тяжести, на фоне которых выделяются отдельные аномалии положительного знака сложной формы северного и северо-восточного простирания, расположенные в основном в южной и центральной частях бассейна, которые совпадают в большинстве случаев с наиболее погруженными грабенообразными структурами бассейна. Бассейн Сунляо в гравитационном поле характеризуется интенсивной аномалией положительного знака. Подобный характер гравитационного поля может свидетельствовать о более близком положении к поверхности пород верхней мантии под бассейном Сунляо.

В значительной степени отличается и мощность земной коры: 37–40 км – в Амуро-Зейском бассейне и 30–32 км – в Сунляо [8, 26].

Восточным ограничением Амуро-Зейского бассейна и его наиболее погруженной части фундамента является Западно-Туранский разлом, который на рис. 5б разделяет две контрастные по своему строению зоны. Положение разлома отчетливо контролируется резким изменением градиента сопротивления в горизонтальном направлении на всю глубину геоэлектрического разреза. Хинганский разлом на рис. 5б отчетливо не проявляется, наиболее контрастно он выражен на рисунке 5а как граница между высокоомной и низкоомной частями геоэлектрического разреза. Подобное отражение Хинганского разлома возможно связано или с коровой глубиной его заложения, или с близостью к области его сочленения с Западно-Туранским разломом.

Восточнее Хинганского разлома геоэлектрический разрез литосферы профиля г. Благовещенск–п. Биракан имеет аномально низкие электрические сопротивления. По результатам предыдущих работ методом МТЗ, выполненных восточнее на Цзямусы-Буреинском массиве [11, 12], его сопротивление определялось чередованием блоков высокого и низкого сопротивления в земной коре и неоднородным строением верхней мантии с сопротивлениями в несколь-

ко сотен Ом·м. Высокими электрическими сопротивлениями в несколько тысяч Ом·м характеризуется и массив Цзямусы [26]. Возможно, различие электрических параметров разрезов связано с термической переработкой литосферы, проявление которой отражено в широком развитии вулканитов в районе пунктов МТЗ № 2 и № 1. В связи с этим необходимо провести дополнительные исследования для уточнения геоэлектрического строения этой части Цзямусы-Буреинского массива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты МТЗ показали эффективность метода при изучении строения и параметров осадочно-чехла Амуро-Зейского бассейна. Дифференциация электрического сопротивления между осадочным чехлом ($10 \div 100$ Ом·м) и фундаментом (свыше 1000 Ом·м) позволяет с большой долей вероятности определить мощность осадочного чехла, максимальные значения которой в пределах профиля достигают 1.5 км. Полученные значения мощности хорошо соответствуют уже имеющимся данным, полученным другими геолого-геофизическими методами. Геоэлектрический разрез осадочного чехла бассейна имеет горизонтально-слоистое строение и его можно интерпретировать в рамках одномерной модели. Это может свидетельствовать о плавном погружении фундамента бассейна. Тем не менее, строение бассейна не является однородным, в нем присутствуют горсты и грабены, что может приводить к искажениям кривых МТЗ. Осадочный чехол бассейна также вызывает региональные гальванические и индукционные эффекты, которые приводят к искажению амплитудных кривых.

2. Впервые получен геоэлектрический разрез литосферы южной части Амуро-Зейского осадочного бассейна до глубины 150 км. В разрезе выделены проводящие слои и области пониженного электрического сопротивления в земной коре и верхней мантии.

3. Показана роль основных разломов, пересеченных профилем, и дана их геолого-геофизическая характеристика. Харбинский и Западно-Туранский разломы являются глубинными и разделяют различные литосферные блоки, различающиеся между собой геоэлектрическим строением. Хинганский разлом в геоэлектрическом разрезе проявился менее контрастно.

4. Показано сходство и различие глубинного строения и геофизических параметров Амуро-Зейского и Сунляо бассейнов. Оба бассейна ограничены глубинными разломами и отмечаются подъемом к поверхности пород верхней мантии пониженного сопротивления. Земная кора и верхняя мантия Амуро-Зей-

ского бассейна имеют более высокое электрическое сопротивление по сравнению с бассейном Сунляо – 1000 Ом·м, 100 Ом·м и 50 Ом·м, 3 Ом·м, соответственно. Гравитационное поле Амуро-Зейского бассейна – пониженное, с аномалиями положительного знака сложной формы северо-восточного простирания, а магнитное поле – дифференцированное, мозаичного типа, с аномалиями северо-восточного простирания, тепловой поток составляет $40\text{--}45$ мВт/м², мощность земной коры – $37\text{--}40$ км. В бассейне Сунляо гравитационное поле характеризуется интенсивной аномалией положительного знака и спокойным, со средним диапазоном изменения от -100 до $+100$ нТ, магнитным полем, тепловым потоком – $75\text{--}80$ мВт/м², мощностью земной коры около 30 км.

5. Рассмотрены вопросы нефтегазоносности участков профиля. Участки бассейна, имеющие мощность осадков более 2 км и сопровождающиеся коровыми и мантийными аномалиями пониженного сопротивления, могут быть перспективными на поиски нефти и газа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен член-корр. РАН А.П. Сорокину за помощь и поддержку в осуществлении данного проекта, а также сотрудникам Института геологии и природопользования Дальневосточного отделения РАН (г. Благовещенск) к.т.н. М.А. Серову и В.С. Жижерину, оказавшим помощь при проведении полевых исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность д.г.-м.н., профессору А.В. Поспееву за ряд полезных замечаний, которые в значительной мере улучшили качество статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-10014 и проекта 09-И-П-14-07 программы Президиума РАН № 14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бердичевский М.Н. Электрическая разведка методом магнитотеллурического профилирования. М.: Недра, 1968. 256 с.
2. Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Науч. мир, 2009. 680 с.
3. Бернштейн Г.Л., Волхонин В.С., Горбачев И.Ф. и др. Геологическая структура Зее-Буреинской впадины по результатам региональных геолого-геофизических работ // Геофизические исследования при решении геологических задач в Восточной Сибири. М.: Изд-во "Недра", 1970. Вып. 4. С. 271–300.
4. Булин Н.К., Вольский А.С. Региональный прогноз потенциальной нефтегазоносности области сочленения Центрально-Азиатского и Восточно-Азиатского рифтогенных поясов по глубинным геофизическим критериям // Тихоокеан. геология. 2005. Т. 24, № 1. С. 3–13.

5. Ваньян Л.Л., Бутковская А.И. Магнитотеллурические зондирования слоистых сред. М.: Недра, 1980. 228 с.
6. Варнавский В.Г. Сравнительный событийный анализ эволюции Зее-Буреинской и Сунляо впадин // Геология и полезные ископаемые Приамурья: Сб. науч. трудов к 50-летию Федерального гос. унитарного горно-геол. предприятия (ФГУГПП) "Хабаровскгеология". Хабаровск: Магеллан, 1999. 227 с.
7. Вассоевич Н.Б. Геохимия органического вещества и происхождение нефти. М.: Наука, 1986. 386 с.
8. Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / Отв. ред. А.Н. Диденко, Ю.Ф. Малышев, Б.Г. Саксин. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с.
9. Инструкция по электроразведке: наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка. Л.: Недра, 1984. 352 с.
10. Золотов Е.Е., Ракитов В.А. Структура литосферы Приамурья по данным МОВЗ-ГСЗ // Региональная геология и металлогения. 2000. № 2. С. 236–240.
11. Каплун В.Б. Предварительные результаты глубинных магнитотеллурических зондирований по профилю п.Облучье – оз.Гасси (Хабаровский край) // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 2. С. 122–135.
12. Каплун В.Б. Геоэлектрический разрез литосферы центральной части Среднеамурского осадочного бассейна по данным магнитотеллурических зондирований (Дальний Восток) // Тихоокеан. геология. 2009. Т. 28, № 2. С. 86–98.
13. Кириллова Г.Л. Сравнительная характеристика внутриконтинентальных рифтовых бассейнов Восточной Азии: Сунляо и Амуро-Зейский // Тихоокеан. геология. 1994. № 6. С. 33–54.
14. Лишнецкий Э.Н., Степанов П.П. Основные черты тектоники центральной и южной частей Зее-Буреинской депрессии // Геология и геофизика. 1963. № 5. С. 117–122.
15. Малышев Ю.Ф., Липина Е.Н. Геотермические характеристики структурных элементов земной коры Восточной Азии и их связь с глубинным строением // Тихоокеан. геология. 1994. № 1. С. 13–27.
16. Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Анненков В.В. Глубинное сейсмическое зондирование на Буреинском массиве // Геология и геофизика. 1987. № 10. С. 98–107.
17. Поспеев А.В. Электропроводность земной коры и мантии по профилю Чара – Ванино // Тихоокеан. геология. 1987. № 6. С. 109–112.
18. Потапьев С.В. Соотношение поверхностной и глубинной структуры земной коры Приамурья и Приморья // Глубинное строение литосферы Дальневосточного региона (по геофизическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 43–53.
19. Сорокин А.П. Геологическое строение домезозойского складчатого фундамента северо-западной части Зейско-Буреинской впадины // Геология Дальнего Востока. Хабаровск: ИТиГ ДВНЦ АН СССР, 1972. С. 151–156.
20. Сорокин А.П. Соотношение структур фундамента и чехла Зейско-Буреинской впадины // Геология Дальнего Востока. Владивосток: ИТиГ ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 31–36.
21. Сорокин А.П., Артеменко Т.В., Дун Циншуй, Чжу Цзеньвэй. Корреляция мезозойских нефтематеринских отложений Зейско-Буреинского бассейна и впадины Сунляо // Геологические исследования в Амурской области. Благовещенск: КПр Амур. обл., 2000. С. 100–102.
22. Тектоника, глубинное строение, металлогения области сочленения Центральноазиатского и Тихоокеанского поясов: Объясн. зап. к Тектонической карте 1:1500000. Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, 2005. 264 с.
23. Шатков Г.А., Бабаев А.О., Максимовский В.А., Пуринг В.В. Тафрогенный комплекс Амуро-Зейской депрессии и перспективы его рудоносности // Тихоокеан. геология. 1984. № 3. С. 54–67.
24. Cheng Zhensen, Hu Xiangyun, Chen Yuxin. Study on the resistivity structure of the lithosphere along the Manzholi-Suifenhe geoscience transect in China // Геофизические поля трансекта Маньчжурия-Суйфэнхэ и исследование глубинного строения. 1994. С. 45-59 (на кит.)
25. Marti A., Queralt P., Ledo J. WALDIM: A code for the dimensionality analysis of magnetotelluric data using the rotational invariants of the magnetotelluric tensor // Computers & Geosciences. 2009. V. 35. P. 2295–2303.
26. Yang Bao-Jun, Mu Shi-min, Jin Xu, Liu Cai. Synthesized study on the geophysics of Manzhouli-Suifenhe geoscience transect, China // Acta Geophysica Sinica. 1996. V. 39, N. 6. P. 772–782 (на кит. яз.).

Рекомендована к печати Ю.Ф. Малышевым

V.B. Kaplun

Geoelectric section of the lithosphere of the Amur-Zeya sedimentary basin along MTS profile Blagoveshchensk–Settlement of Birakan

Results of magnetotelluric soundings (MTS) carried out along 350-km length profile Blagoveshchensk – Settlement of Birakan are considered. The profile makes its start in the Longjiang-Selemja orogenic belt and terminates on the Jiamusi-Bureya Massif thus northwestwardly-southeastwardly crossing the Amur-Zeya sedimentary basin in its southern part. There have been carried out 12 soundings within a broad frequency range from $1 \cdot 10^4$ to $2 \cdot 10^{-4}$ Hz. The geoelectric section down to 2 and 150 km depths has been constructed, the geoelectrical parameters of the sedimentary cover of the basin have been determined and the anomalous electrical conductivity crust and upper mantle zones have been distinguished.

Key words: magnetotelluric soundings, deep structure, Amur-Zeya sedimentary basin.